

ÓPTIMO FLUJO DE POTENCIA REACTIVA EN REDES ELÉCTRICAS DE
DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
ÓPTIMO FLUJO DE POTENCIA REACTIVA EN REDES ELÉCTRICAS DE
DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

**AUTOR:
JOHANNA MARLENE INACHONTA MONTA**

**DIRECTOR:
ALEXANDER ÁGUILA TÉLLEZ**

Quito, Mayo 2017

Johanna Marlene Inachonta Monta

**ÓPTIMO FLUJO DE POTENCIA REACTIVA EN REDES ELÉCTRICAS DE
DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2017

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto:



Johanna Inachonta (A'1991-M'02), nació en Quito, Ecuador. Bachiller con especialidad en Físico Matemático en el Colegio Cardenal Carlos María de la Torre, Ecuador 2008. Egresada de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se enfoca en el estudio de algoritmos matemáticos orientados a la optimización de redes de distribución para el óptimo flujo de potencia reactiva con generación distribuida.

jinachonta@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Alexander Águila (A'1981-M'09) recibió el título de Ingeniero Eléctrico y el de Máster en Eficiencia Energética en los años 2005 y 2010 respectivamente. Actualmente se encuentra estudiando para obtener su título de Doctor en Ingeniería en la Universidad Pontificia Bolivariana - Colombia-Medellín, es miembro del Grupo de Investigación GIREI. Sus principales intereses de investigación incluyen la compensación VOLT-VAR en redes de distribución eléctrica, redes inteligentes, minimización de pérdidas de energía, las energías renovables y la eficiencia energética. Es profesor investigador de la Universidad Politécnica Salesiana- Ecuador.

aaguila@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

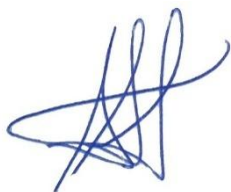
2017 Universidad Politécnica Salesiana

Quito – Ecuador

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Alexander Águila Téllez declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación (*ÓPTIMO FLUJO DE POTENCIA REACTIVA EN REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA*) realizado por (Johanna Marlene Inachonta Monta), obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Mayo 2017



.....
Alexander Águila Téllez

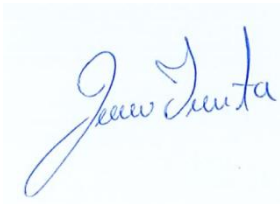
Cédula de identidad: 1755983184

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, JOHANNA MARLENE INACHONTA MONTA , con documento de identificación N° 172390337-1, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “ÓPTIMO FLUJO DE POTENCIA REACTIVA EN REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA ”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO ELÉCTRICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



.....
Nombre: Johanna Marlene Inachonta Monta

Cédula: 172390337-1

Fecha: Quito, Mayo 2017

INDICE GENERAL

1. Introducción	2
1.1.Objetivos	3
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3.Materiales, fuentes y métodos.....	4
2. Método de análisis	4
2.1 Tabú Search	4
2.1.Tabú List	5
2.2.Algoritmo.	6
2.3.Caso de estudio	6
3. Compensación de Potencia	7
3.1.Ahorro real de perdida de potencia	8
3.2.Ahorro de perdida de potencia reactiva	8
4. Generación Distribuida	8
4.1.Factor de potencia de DG	8
4.2.Estabilidad de tensión y unidades de DG	9
4.3.Tamaño y ubicación de DG	9
5. Análisis de resultados	9
6. Conclusiones	12
7. Referencias.....	13
7.1.Estado del arte.....	16
8. Anexos	18

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Implementación de generación distribuida dentro del sistema eléctrico	5
Figura 2. Buscar dirección de la búsqueda tabú	6
Figura 3. Sistema de 9 barras	7
Figura 4. Sistema de 30 barras	7
Figura 5. Sistema radial de N-bus	8
Figura 6. Sistema radial de N-bus con ubicación de DG en el bus k	8
Figura 7. Buses de compensación de sistema de 9 barras	10
Figura 8. Buses de compensación de sistema de 30 barras	10
Figura 9. Potencia activa de sistema de 9 barras	10
Figura 10. Potencia activa de sistema de 30 barras	11
Figura 11. Potencia reactiva de sistema de 9 barras	11
Figura 12. Potencia reactiva de sistema de 30 barras	11
Figura 13. Sistema de 9 barras con DG y sin DG	11
Figura 14. Sistema de 30 barras con DG y sin DG	11

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos del sistema de 9 barras	6
Tabla 2. Datos del sistema de 30 barras	7
Tabla 3. Resultados de la compensación de 9 barras	10
Tabla 4. Resultados de la compensación de 30 barras	10
Tabla 5. Matriz del estado del arte	16
Tabla 5. Resumen e indicador del estado del arte	17

ÓPTIMO FLUJO DE POTENCIA REACTIVA EN REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Resumen

En el presente documento se desarrolló el análisis de óptimo flujo de potencia reactiva en los sistemas de distribución, en donde se abordó los problemas dentro del flujo de potencia, determinando las pérdidas de potencia como una causa, que se compensa con la colocación de generación distribuida.

El análisis se realizó a través del método de tabú search (TS), el cual fue realizado en el software de matlab, por medio de su librería math power, pudimos establecer las características de cada sistema, además este método nos permitió analizar la ubicación de la generación distribuida para el sistema de distribución, además TS se encargó de evaluar las funciones de costos. Este trabajo fue desarrollado para los sistemas de 9 y 30, así obteniendo dos casos de estudio, realizando una comparación de las pérdidas de potencia y analizando la estabilidad de voltaje en cada uno de ellos.

Con el estudio realizado se pudo lograr, mejorar los perfiles de voltaje, aunque en algunas barras, estas se mantuvieron constantes de tal manera que no afectaron al sistema, también se logró compensar las pérdidas de potencia, ayudando así a dar estabilidad, confiabilidad y un ahorro económico al sistema de distribución.

Palabras Clave: compensación de potencia reactiva, minimización de pérdidas, mejoramiento de los perfiles de voltaje, tabú search, redes de distribución, DG.

Abstract

In this paper the analysis of optimum reactive power flow was developed in the distribution systems, where problems were addressed within the power flow, determining the power losses as a cause, which is compensated by the distributed generation placement.

The analysis was performed through the tabu search (TS) method, which was performed in the matlab software, through its math power library; we were able to establish the characteristics of each system. In addition this method allowed us to analyze the location of the distributed generation for the distribution system, moreover TS was in charge of evaluating the cost functions. This work was developed for the systems of 9 and 30, thus obtaining two cases of study, making a comparison of the losses of power and analyzing the stability of voltage in each one of them.

With the study, it was possible to improve the voltage profiles, although in some bars, these were kept constant in such a way that they did not affect the system, it was also possible to compensate the power losses, thus helping to keep stability, reliability and a Economic savings to the distribution system.

Keywords: Reactive power compensation, loss minimization, voltage profile improvement, tabú search, distribution networks, DG.

1. Introducción

Para obtener una mejor estabilidad en las redes de distribución de energía eléctrica, es necesario el mejoramiento de la fiabilidad y calidad en la matriz energética de nuestro país[1], de tal manera que no afecte al medio ambiente a través de la reducción de gases de efecto invernadero, consumo de combustibles fósiles en la generación de energía, para lo cual se puede insertar generación distribuida (DG) usando energía renovables, que permitirán mejorar el desenlace en el futuro de los sistemas de distribución de energía eléctrica.[1][2]

El estudio del sistema de distribución de energía eléctrica es muy importante debido al vínculo que tienen entre el sistema eléctrico y los consumidores. Sin embargo, el flujo de potencia dentro de la red de distribución continuamente produce pérdidas de alta potencia. Uno de los métodos para la reducción de las pérdidas [4] dentro del sistema es la inyección de reactivos, el cual nos permite la reducción de pérdidas y adicionalmente otros beneficios adicionales como estabilidad y mejoramiento de los perfiles de voltaje, corrección del factor de potencia. Para lo cual se puede usar condensadores de derivación siendo un equipo básico para realizar la compensación de reactivos [5].

Para obtener un flujo óptimo de potencia reactiva (ORPF) dentro de las redes de distribución se determina un punto indicado para reducir el costo de operación o de pérdidas de potencia, este es el principal problema de flujo de potencia óptimo(OPF) [6].

Los diferentes métodos para la compensación de potencia reactiva en los sistemas eléctricos de potencia ayudan a disminuir pérdidas resistivas, mejoran los niveles de tensión y el factor de potencia.

Dentro del mercado existen varios tipos de compensadores, uno de ellos el compensador

estático (SVC) que emplea la técnica de control electrónico de potencia para la compensación de la potencia reactiva, el cual es utilizado en sistemas de potencias industriales que equilibra las variaciones de consumo de potencia reactiva. Aunque la utilización de SVC en la actualidad no es la más razonable en los sistemas de distribución, la más opcional para su utilización son los bancos de capacitores y la generación distribuida las cuales generan costos satisfactorios, además permiten una compensación de la potencia reactiva en las redes de distribución de baja tensión(LV) [7].

Otro de los métodos para la reducción de pérdidas de potencia en un sistema de distribución es la implementación de generación distribuida (DG), que se encarga de mejorar los perfiles de tensión, para lo cual se debe realizar un óptimo dimensionamiento y ubicación de las unidades de DG el cual es importante para la reducción de pérdidas, mejora los perfiles y generar estabilidad al voltaje en el sistema.[8][9][10].

La generación distribuida se conecta directamente a la mayor cantidad de demanda del sistema de distribución, esta energía puede variar de kilovatios a megavatios de tamaño, la más utilizadas son las energías renovables (fotovoltaicas, eólicas, biomasa, etc) [11][12].

La generación distribuida son mini centrales conectadas directamente a la red de distribución, posteriormente la energía llegará a una sub estación de distribución de donde será distribuida al consumidor al cual se le asignará un medidor, en la actualidad ha ido en aumento la implementación de DG dentro del sistema, el cual genera un impacto dentro del análisis técnico, económico y ambiental[13]. La implementación de DG tiene muchos beneficios, como postergación a la construcción de nuevas líneas de transmisión y distribución, reduciendo las pérdidas de potencia, mejorando los niveles de voltaje en el

bus dando una mejor fiabilidad y confiabilidad al sistema. Para realizar la colocación de estos equipos dentro de la red de distribución, se debe analizar el comportamiento de los parámetros del sistema como las variaciones en el perfil de voltaje en los buses, el comportamiento del flujo de potencia y sus pérdidas, la alteración de armónicos, el nivel de estabilidad de voltaje y la confiabilidad del sistema[9][10].El planteamiento se realiza para dimensionar la capacidad optima y ubicación de las unidades de generación distribuida a través de energías renovables para reducir pérdidas anuales de energía dentro del sistema[16].

La ubicación de DG puede tener varios impactos dentro del sistema, mejorar o empeorar la calidad del voltaje del sistema a cargo del factor de potencia, también puede aumentar o disminuir las pérdidas de potencia en el sentido del flujo de energía y la colocación de DGs [11].

Para la colocación del tamaño de la generación distribuida se puede utilizar varios métodos, las que pueden ser a través de programación lineal, entera mixta, estos métodos nos permiten resolver problemas de optimización. Lo más importante es la manera para introducir la DG dentro de un sector de la red de distribución, sin embargo, esto funcionaria dentro de un sistema lineal pero no es un caso real. Otro método es tabú search (TS) por medio de búsquedas plantea un resultado óptimo al problema, además el TS es distinguido por ser el tiempo del algoritmo y de su amplitud de ser atrapado en un mínimo espacio, en el TS se puede introducir el algoritmo de optimización de partículas (PSO) para obtener el dimensionamiento óptimo y mejor lugar para colocar DG para minimizar las pérdidas de potencias del sistema.[17] Además se puede considerar otros métodos tales como algoritmo de segundo orden, de tipo meta heurística por ejemplo algoritmo genético, hereford ranch, fuzzy GA, tabú search y todo los metódicos. En

las investigaciones realizadas para la colocación óptima de DG se puede definir para las diferentes opciones de cargas por ejemplo de tipo uniforme cada vez más utilizado en sistema radiales para la reducción de pérdidas.[18]

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Realizar un modelo matemático de optimización del flujo de potencia, mediante el algoritmo de tabú search, para la implementación de generación distribuida en las redes de distribución, buscando minimizar las pérdidas de potencia, en los sistemas de 9 y 30 barras de la IEEE.

1.1.2 Objetivo específico

Establecer los índices y límites de eficiencia y confiabilidad para la implementación de generación distribuida dentro del sistema de distribución.

Analizar las pérdidas del sistema, dentro de esta las de potencia activa y reactiva, para la compensación de reactivos.

Determinar la adecuada ubicación de la generación distribuida, mediante el algoritmo tabú search para determinar su ubicación al mínimo costo.

1.2 Planteamiento del problema

Las investigaciones muestran que casi 10 al 13 % de la potencia generada se pierde como I^2R pérdidas en la escala de distribución, que a su vez genera un incremento del costo de energía provocando un imperfecto nivel de voltaje a lo largo de las líneas de distribución [13]

Ecuaciones para el flujo de potencia

Para el cálculo del flujo de potencia dentro del sistema de distribución se realiza a través de diferentes ecuaciones obtenidas del esquema del sistema de una sola línea.

La pérdida en la línea conectada entre i e $i+1$ de los autobuses se pueden obtener:[5]

$$P_{Loss\ i, i+1} = I_i^2 * R_i \quad (1)$$

Las pérdidas de potencia en las líneas que se conectan a los buses i e $i+1$ se obtiene: [13][5]

$$P_{LOSS \ i, i+1} = R_i * \frac{P_{i+1}^2 + Q_{i+1}^2}{V_{i+1}^2} \quad (2)$$

$$Q_{LOSS \ i, i+1} = X_i * \frac{P_{i+1}^2 + Q_{i+1}^2}{V_{i+1}^2} \quad (3)$$

Las pérdidas de potencia del sistema, se podría definir por la sumatoria de las pérdidas de cada nodo del sistema, se obtiene: [3][8]

$$P_{T,LOS} = \sum_{i=1}^{n-1} P_{LOSS \ i, i+1} \quad (4)$$

Función objetiva del problema

La función objetiva (FO) se formula para que minimice las pérdidas de potencia del sistema.

De tal forma que pueda dar una estabilidad en los niveles de tensión y mejorando el factor de potencia.

$$Fobj = \min_{i=1} f_i Pgi \quad (5)$$

Para lo cual se toma las siguientes restricciones. [19]

$$Pg_{min} \leq Pg \leq Pg_{max} \quad (6)$$

$$Vg_{min} \leq Vg \leq gV_{max} \quad (7)$$

La restricción de costos se obtiene de una ecuación estadística que nos permita evaluar la curva de generación del sistema, para la ecuación 8.[20][21]

$$C_g = a + bP + cPg^2 \quad (8)$$

Donde:

a, b, c= coeficientes de costo de generación

1.3 Materiales, fuentes y métodos

Se puede proponer varios esquemas para la DG, obtenido sus resultados de la comparación de varios escenarios que se realizaran a través de una optimización mediante el software de Matlab el cual con su librería Math Power nos permitirá obtener los datos del sistema, los cuales a través del TS se podrá minimizar las pérdidas y el costo del flujo de potencia, con la implementación de generación distribuida, que se observa en la figura 1.

2. Metodología de análisis

Mediante las redes de distribución con generación distribuida se puede emplear distintos métodos ya que la gran mayoría tienen como principio la reducción de pérdidas de flujo de potencia, mejorando los perfiles de voltaje, eliminando las perturbaciones, entre otros aspectos que tenga efectos dentro del sistema, esto puede variar en función del dimensionamiento y ubicación de la DG.

Existen varios estudios empleados para el dimensionamiento y ubicación de DG dentro de las redes de distribución, por lo cual se han implementado diferentes sistemas para la resolución del problema entre ellas están: algoritmo genético, algoritmo de búsqueda (TS), algoritmo de luciérnagas algoritmo artificial de colonia de abejas, los métodos demostrados mediante algoritmos heurísticos, algoritmos meta-heurísticos y algoritmos de inteligencia de enjambre de partículas (PSO) [22].

2.1. Tabú Search

El algoritmo de tabú search(TS) es muy diferente al resto de técnicas. Su método se enfoca en buscar de manera precisa, apoyándose de forma sistemática. Los casos aleatorios de búsqueda no se toman mucho en cuenta .

La esencia del TS es la utilización de barrios, estudia cada barrio de donde busca las posibles soluciones de tal manera que va clasificando los valores tabúes para crear una lista de candidatos, la cual puede tener variaciones en las propiedades de cada topología que exista en la red. Una matriz sistemática nos permite guardar las soluciones adecuadas en la lista tabú.

Tabú search conserva los resultados últimamente obtenidos para evitar mínimos locales. Los resultados previamente revisados el fin de ver las áreas desconocidas del lugar de búsqueda. También la búsqueda tabú (TS) es

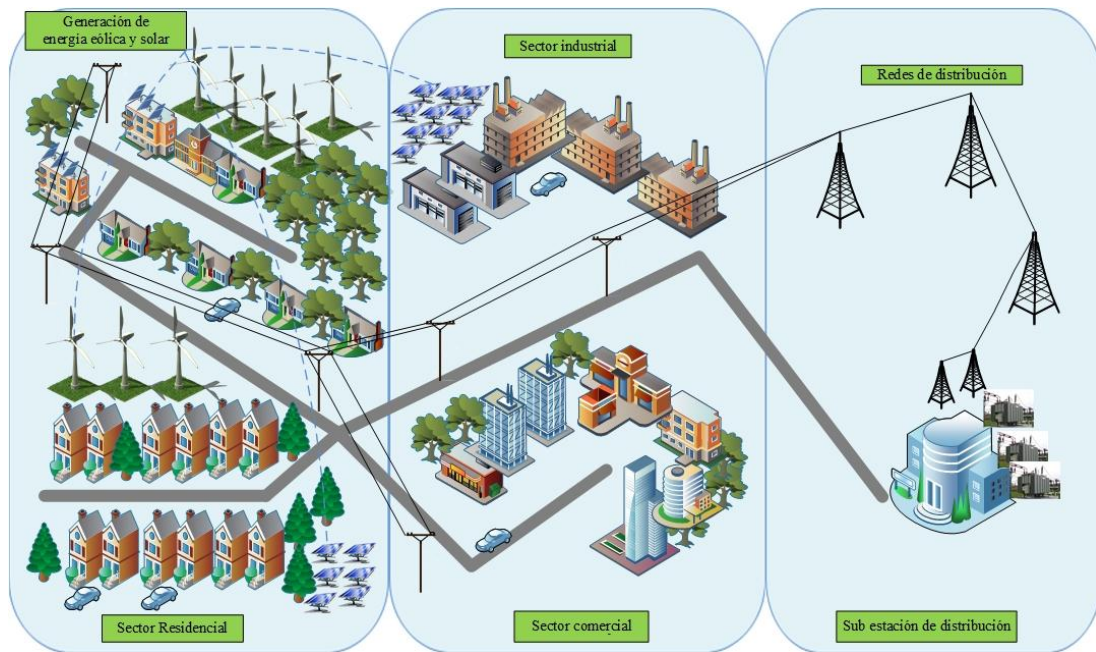


Figura 1. Implementación de generación distribuida dentro del sistema eléctrico.

un método de combinaciones que permite obtener un óptimo resultado dentro de un determinado tiempo, este puede ser corto siempre y cuando la complejidad del problema no sea muy alta.

De tal manera este método se puede implementar en un óptimo flujo de potencia.

El TS tiene varias ventajas para solucionar los problemas del OPF, este utiliza una búsqueda repetitiva a lo largo del recorrido, empezando de un resultado posible como resultado presente de los vecindarios, después elige un resultado deseado del vecindario como nuevo resultado para continuar con la búsqueda. Esto se desarrolla de una manera iterativa, que efectúa las restricciones determinadas [23]

Para aplicar la búsqueda tabú (TS) en este estudio para la reducción de pérdidas en redes de distribución, si la DG es correctamente usada de manera óptima en donde se encuentra una gran cantidad de carga dentro del sistema de energía, cumpliendo los requisitos de cantidad de DG y la cantidad adecuada.

Otorgando el rendimiento de la energía no controlable en la instalación y la estrategia

operativa de la DG, el objetivo de este estudio es dar a conocer la reducción de las pérdidas de potencia en las redes de distribución de manera matemática mediante la ubicación óptima de DG, o que modelo de táctica de instalación de DG son efectivos para la disminución de las pérdidas de distribución para las empresas distribuidoras.

Con el fin de estudiar lo anterior, modelo para la ubicación de la DG, para la minimizar de las pérdidas de potencia con la utilización de búsqueda tabú. Cada búsqueda nos permite determinar el dimensionamiento de DG y la ubicación de DG correspondientemente

2.2 Tabú List

Cada equipo cuenta con una variable de tipo tabú, cuando se realiza un movimiento de este elemento, su valor incrementa en una o varias cantidades (se determina el número de iteraciones que es el elemento no se debe tomar en cuenta).

La cantidad de la variable tabú de cada equipo verificado es positiva, esto reduce la cantidad de cada iteración. La lista tabú es un grupo de equipos diferentes de cero, los cuales no deben

alcanzar un valor alto ya que esto no permite la búsqueda dentro de todas las posibles soluciones, pero se debe verificar ciertos lugares, más lejos de los mínimos locales.

Se debe recordar que las posteriores iteraciones si el valor es mayor a cero, el desplazamiento no será elegido como posible solución. [24] [25]. La figura 2 muestra el concepto principal de una dirección de búsqueda en Búsqueda tabú[26]

El tabú list se encarga de almacenar las soluciones tabúes de cada barrio que se genera dentro de un lugar determinado inmerso dentro del sistema.

2.3 Algoritmo

El resultado tiene como parámetros iniciales sus valores por defecto, de tal manera que la búsqueda tabú se encarga de recorrer varios barrios de los cuales toma cada nueva solución buscando la mejor de ellas sin embargo en ocasiones puede tomar la peor solución.

La búsqueda tabú accede a revisar algunas de los peores resultados anteriores, con la finalidad

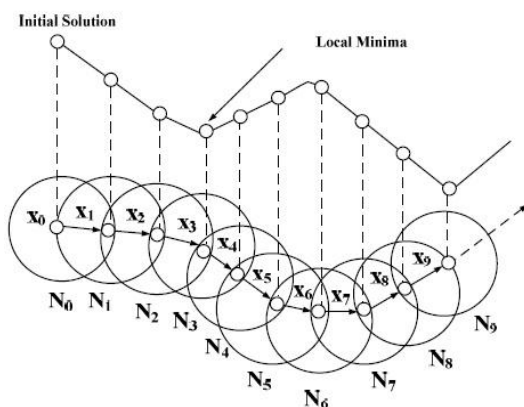


Figura 2. Buscar dirección de la búsqueda Tabú [26] de diferenciar las búsquedas. La lista tabú es el resultado del último desplazamiento realizado. Esta simple táctica previene de caer en mínimos locales en diferenciar la búsqueda, además nos permite apresurar la búsqueda, obteniendo una lista con los mejores resultados del barrio analizado.

El algoritmo lo podemos expresar de la siguiente manera:[27]

Paso 1. Inicialización

Seleccionamos las soluciones iniciales factibles X , ponemos un número máximo de iteraciones t_{max} , obtenemos las mejores soluciones X , el número de soluciones lo iniciamos en $t=0$, creamos la lista tabú vacía

Paso 2. Parada

Si los movimientos posibles de la solución es un valor tabú o a su vez el número de soluciones es igual al tiempo máximo de iteraciones entonces este puede detenerse para entregar una mejor solución.

Paso 3. Mover

En este paso se debe elegir la mejor opción o movimiento que no sea tábu en

$\Delta x \ t + 1$

Paso 4. Iteraciones

$x \ t + 1 = x \ t + \Delta x \ t + 1$ se hace esta modificación para cumplir todo el proceso de tal manera que tengamos las soluciones deseadas.

Paso 5. Reemplazar

Si el valor de función objetiva $x \ t + 1$ es mayor a la primera posible solución entonces la mejor solución es $x \ t + 1$

Paso 6. Lista tabú

En la lista tabú se tiende a borrar los movimientos que han estado en un mismo número de iteraciones dentro de la lista, de tal manera que se agrega a la matriz de movimientos que implica un regreso continuo de $x \ t + 1$ a $x(t)$

Paso 7. Incremento

$t = t + 1$ una vez que termine el proceso regresamos al paso 2

2.4 Caso de estudio

Para este trabajo se realizará el análisis del sistema de 9 barras y de 30 barras respectivamente. Los cuáles serán expuestos en la tabla 1 y tabla 2 y sus respectivas graficas del sistema de distribución en la figura 3 y 4.

Donde las ramas son de tipo (T), 1 es las líneas y 2 los transformadores todos los datos se encuentran por unidad.

Tabla 1: Datos del sistema de 9 barras.

ID	INI	FIN	T	R	X
1_4	Bus 1	Bus 4	2	0	0.0576
4_5	Bus 4	Bus 5	1	0.017	0.0920
5_6	Bus 5	Bus 6	1	0.39	0.1700
3_6	Bus 3	Bus 6	2	0	0.0586
6_7	Bus 6	Bus 7	1	0.0119	0.1008
7_8	Bus 7	Bus 8	1	0.0085	0.0720
8_2	Bus 8	Bus 2	2	0	0.0625
8_9	Bus 8	Bus 9	1	0.032	0.1610
9_4	Bus 9	Bus 4	1	0.01	0.085

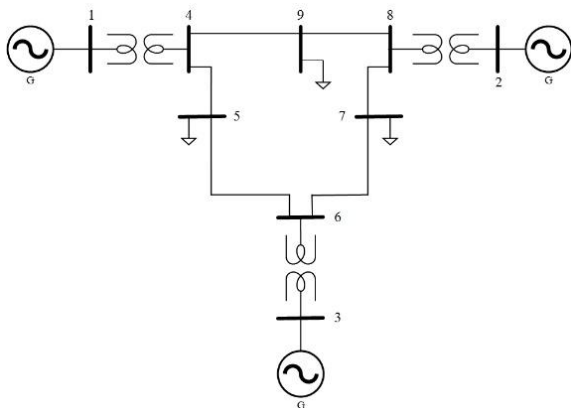


Figura 3. Sistema de 9 barras.

Tabla 2: Datos del sistema de 30 barras

ID	INI	FIN	T	R	X
1_2	Bus 1	Bus 2	1	0.0192	0.0575
1_3	Bus 1	Bus 3	1	0.452	0.1852
2_4	Bus 2	Bus 4	1	0.057	0.1737
3_4	Bus 3	Bus 4	1	0.0132	0.0379
2_5	Bus 2	Bus 5	1	0.0472	0.1983
2_6	Bus 2	Bus 6	1	0.0581	0.1763
4_6	Bus 4	Bus 6	1	0.0119	0.0414
5_7	Bus 5	Bus 7	1	0.046	0.116
6_7	Bus 6	Bus 7	1	0.267	0.082
6_8	Bus 6	Bus 8	1	0.012	0.042
6_9	Bus 6	Bus 9	2	0	0.208
6_10	Bus 6	Bus 10	2	0	0.556

9_11	Bus 9	Bus 11	1	0	0.208
9_10	Bus 9	Bus 10	1	0	0.11
4_12	Bus 4	Bus 12	2	0	0.256
12_13	Bus 12	Bus 13	1	0	0.14
12_14	Bus 12	Bus 14	1	0.1231	0.2559
12_15	Bus 12	Bus 15	1	0.0662	0.1304
12_16	Bus 12	Bus 16	1	0.0975	0.1987
14_15	Bus 14	Bus 15	1	0.221	0.1997
16_17	Bus 16	Bus 17	1	0.0824	0.1932
15_18	Bus 15	Bus 18	1	0.107	0.2185
18_19	Bus 18	Bus 19	1	0.0639	0.1292
19_20	Bus 19	Bus 20	1	0.034	0.068
10_20	Bus 10	Bus 20	1	0.0936	0.209
10_17	Bus 10	Bus 17	1	0.324	0.0845
10_21	Bus 10	Bus 21	1	0.0348	0.0749
10_22	Bus 10	Bus 22	1	0.0727	0.1499
21_22	Bus 21	Bus 22	1	0.0116	0.0236
15_23	Bus 15	Bus 23	1	0.1	0.202
22_24	Bus 22	Bus 24	1	0.115	0.179
23_24	Bus 23	Bus 24	1	0.132	0.27
24_25	Bus 24	Bus 25	1	0.1885	0.3292
25_26	Bus 25	Bus 26	1	0.2544	0.38
25_27	Bus 25	Bus 27	1	0.1093	0.2087
28_27	Bus 28	Bus 27	2	0	0.396
27_29	Bus 27	Bus 29	1	0.2197	0.4153
27_30	Bus 27	Bus 30	1	0.3202	0.6027
29_30	Bus 29	Bus 30	1	0.2399	0.4533
8_28	Bus 8	Bus 28	1	0.0639	0.2
6_28	Bus 6	Bus 28	1	0.0169	0.0599

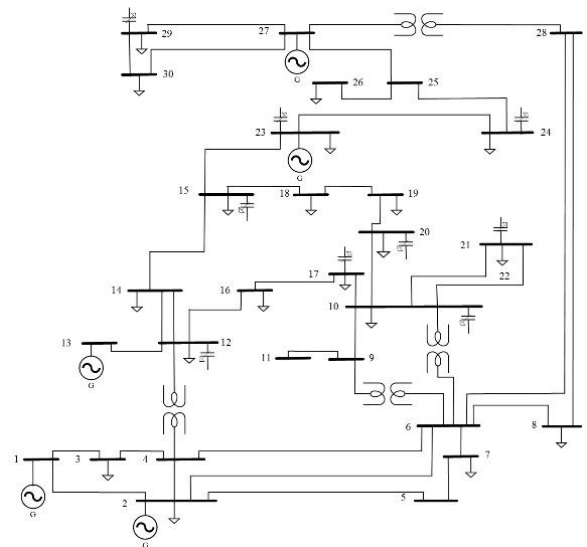


Figura 4. Sistema de 30 barras.[19]

3. Compensación de la potencia

Compensación de reactivos es importante para las regulaciones de los perfiles de voltaje dentro de los sistemas de distribución[28].

En los sistemas de distribución lo más común es la utilización de bancos de condensadores,

estos nos permiten mantener el factor de potencia cercano a uno y de compensar la caída de tensión cuando se tiene una alta demanda, otro método para compensar los sistemas de distribución es el acoplamiento por DG, ya que la caída de tensión y el incremento de voltaje es uno de los problemas, además se necesita un ingreso de potencia reactiva a través de una fuente que pueda trabajar de manera inductiva y capacitiva.

La potencia reactiva necesaria puede ser inyectada dentro del sistema, a través de las unidades de DG síncronas, estas realizarán la compensación de la potencia reactiva faltante dentro del sistema ayudando a las tensiones del sistema. Los sistemas de control comunes están adecuados para adaptar la potencia reactiva de las máquinas síncronas el cual controla automáticamente el factor de potencia y normaliza la tensión. De esta manera el control automático del factor de potencia y potencia reactiva de DG puede resistir los cambios de la potencia activa de DG, de tal manera que la relación $\frac{PDG}{QDG}$

se mantiene de manera constante, para conservar los límites de tensión en el sistema.[29]

3.2 Ahorro real de pérdida de potencia

La pérdida de potencia activa (PL) dentro de un sistema de distribución radial de N-bus como se indica en la figura 5, se determina:[30]

$$P_L = \sum_{i=1}^{N-1} I_i^2 R_i = \sum_{i=1}^{N-1} (I_{ai}^2 + I_{ri}^2) R_i \quad (9)$$

Donde I_i es la corriente que recorre por la rama con I_{ai} y I_{ri} y la resistencia R_i de las ramas.

Siendo las pérdidas de potencia activa luego de colocar la DG es:

$$P_L^{new} = \sum_{i=1}^{N-1} I_i^{new\ 2} R_i \quad (10)$$

$$= \sum_{i=1}^{N-1} \left(I_{ai} - \sum_{k=1}^m D_{ik} I_{aDG}^k \right)^2 R_i + \sum_{i=1}^{N-1} \left(I_{ri} - \sum_{k=1}^m D_{ik} I_{aDG}^k \tan \phi^k \right)^2 R_i$$

Donde:

I_{ai} : corriente real

I_{ri} : corriente imaginaria

3.3 Ahorro real de pérdida de potencia reactiva

Las pérdidas de potencia reactiva QL en el N-bus que se indica en la figura 3 se da por:[30]

$$Q_L = \sum_{i=1}^{N-1} I_i^2 X_i \quad (11)$$

$$= \sum_{i=1}^{N-1} (I_{ai}^2 + I_{ri}^2) X_i$$

Con la ubicación de la DG la potencia reactiva está dada por:

$$Q_L^{new} = \sum_{i=1}^{N-1} I_i^{new\ 2} X_i \quad (12)$$

$$= \sum_{i=1}^{N-1} \left(I_{ai} - \sum_{k=1}^m D_{ik} I_{aDG}^k \right)^2 X_i + \sum_{i=1}^{N-1} \left(I_{ri} - \sum_{k=1}^m D_{ik} I_{aDG}^k \tan \phi^k \right)^2 X_i$$

4. Generación distribuida

4.1. Factor de potencia de DG

El análisis de un sistema radial de N-bus expuesto en la figura 5, donde podemos observar IK que viene a ser la corriente fasorial de la carga que se encuentra conectada al nodo K, al ubicar la DG en el bus que necesita la compensación de potencia como se muestra en la figura 6, IDG donde se inyecta corriente dentro de la red, de tal manera que altere las corrientes de las ramas que se encuentren conectadas entre la subestación al bus K. No obstante las corrientes de ramas persistentes no

son afectadas por la DG que se encuentren en el bus k.[30]

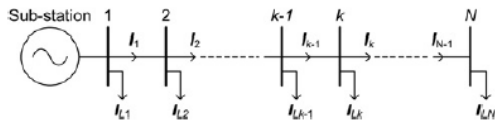


Figura 5. Sistema radial de N-bus [30].

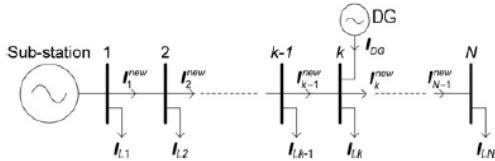


Figura 6. Sistema radial N-bus con ubicación de DG en el bus K [30].

4.2. Estabilidad de tensión y unidades DG

El índice de estabilidad de voltaje que se establece en el bus con más déficit para definir la ubicación del bus candidato que necesita la implementación de DG dentro del sistema. Las evaluaciones para los buses candidatos ayuda a reducir el área de búsqueda para realizar la optimización.[13] [20]

4.3. Tamaño y ubicación de la DG

Para tener una ubicación adecuada se propone la siguiente técnica [31], usando este método se identifica los lugares adecuados y el tipo de DG, y las pérdidas se evalúan para dimensionar el tamaño para cada caso.[12]

Para encontrar el lugar más adecuado para la instalación DG se puede considerar los siguientes pasos:

- Determinar la ubicación con mayor déficit de pérdida de potencia activa y reactiva en cada bus.
- Organizar los autobuses de forma descendente de su déficit de potencia.
- El bus con mayor déficit de pérdida de potencia, requiere la inyección de potencia en el bus adecuado para la ubicación de DG mientras que el autobús con mayor pérdida de potencia se lo identifica y se realiza la ubicación en el bus de inyectar reactivos [32]

Los límites para el tamaño de la DG dentro del

este análisis se configuran a las unidades de DG de tipo A (sistemas fotovoltaicas y micro turbinas) , distribuyen potencia además factor de potencia individual a las unidades de DG de tipo B(generator síncrono controlables, plantas de biogás) las cuales la potencia y factor de potencia de operación predeterminado es de 0.85, sin embargo el rango de kW de distribución de la DG está en el rango de 10% al 80% de la carga total de la energía del sistema [14].

Para dimensionar el tamaño de DG se puede considerar los siguientes pasos:

- Una vez establecido la colocación de la DG, la capacidad máxima es del 100% del total de la demanda una vez que se conecte a la red. Para lo cual se debe realizar el flujo de carga y a través de las ecuaciones se adquiere el valor de las pérdidas y se comprueba las restricciones si en caso no se cumpla una de ellas se debe incrementar o disminuir la capacidad en un 5 %, nuevamente se realiza el flujo de carga para verificar que no sobrepase los límites establecidos del tamaño.
- El paso (a) se repite para todos los casos hasta obtener el lugar mínimo de pérdidas.
- El tamaño de la DG adecuado del bus o punto de pérdidas son las capacidades óptimas.
- Ubicar los tamaños adecuados teniendo en cuenta los pasos anteriores y nuevamente realizar el flujo de carga para verificar los valores de las tensiones y corrientes del sistema.[32]

5. Análisis de resultados

Se realizará el análisis de los sistemas de 9 y 30 barras, en donde se observará varios parámetros del sistema y su comportamiento dentro del mismo. Los valores base utilizados son de 0.95 a 1.05 p.u en voltaje, mientras que el factor de

potencia (FP) es 1, además el costo será buscado por el algoritmo de tabú search el cual escogerá una solución, la misma que nos mostrará el ahorro (\$/h) dentro del sistema.

Para la compensación de flujo de potencia con la ubicación de la DG debemos inyectar potencia activa y reactiva en el bus.

Para la ubicación de un sistema de distribución a prueba, las barras en que se conectar la DG, para el sistema de 9 barras será en las barras 6 y 8, mientras que en el sistema de 30 barras será las barras de 15 y 30.

La importancia de la ubicación de la DG, es la reducción de pérdidas de potencia [MW] dentro del sistema, para lo cual a través del algoritmo se buscó la cantidad de pérdidas, mediante cada iteración dándonos como resultado, en el caso de 9 barras una pérdida de 1350.3[MW], la cual con la colocación de DG se reduce 1348 [MW]. En el caso del sistema de 30 barras las pérdidas son mayores ya que el sistema es más de tal manera que la pérdida es de 7920.1 [MW], esta se reduce con DG a 7912 [MW].

La colocación de DG, en el sistema de 30 barras en el bus 15 y 30, donde las pérdidas se reducen en 8 [MW], mientras que el sistema de 9 barras se coloca en el bus 6 y 8, reduciendo las pérdidas en 3 [MW].

La figura 7 muestra la compensación de potencia activa y reactiva, donde se compara el sistema sin la colocación de DG y el sistema con la colocación de la DG, los buses donde se realiza la compensación son barras 6 y 8 donde se inyecta reactivos y activos, de tal manera que reduzca las pérdidas dentro del sistema de distribución.

La figura 8 muestra la comparación del sistema sin y con la implementación de DG en los respectivos buses, además la compensación se realiza en los buses 15 y 30 donde se inyecta reactivos y activos, de esta manera se reducirá las pérdidas dentro del sistema.

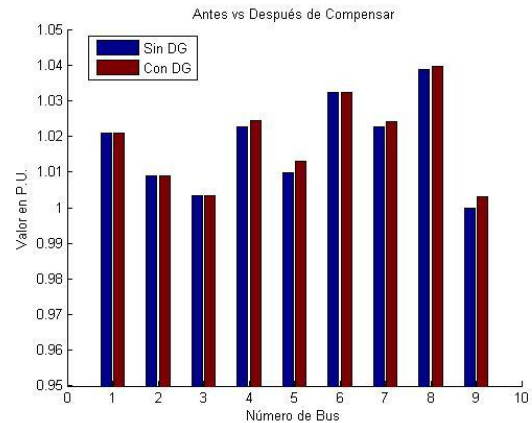


Figura 7. Buses de compensación en sistema de 9 barras

Para realizar la compensación en cada uno de los sistemas el algoritmo tabú, fue buscando dentro de los vecindarios los valores tabús e ir comparándolos para verificar en cuales barras dentro del sistema necesitaba inyectar reactivos y activos, pero para lo cual o debía mantenerse dentro de las restricciones permitidas.

Se puede ver el sistema de 30 barras la cantidad de potencia que se inyecta en las barras es mayor a la del sistema de 9 barras ya que este sistema es más pequeño así que tiene menores pérdidas que en el de 30 barras

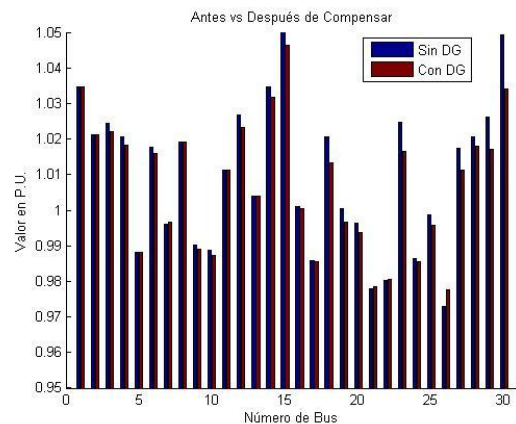


Figura 8. Buses de compensación en sistema de 30 barras.

Tabla 3: Resultado de compensación de 9 barras

Bus	Qc (MVar)	Pc(MW)
6	83.68400	0.41184
8	20.58772	0.22494

Tabla 4: Resultado de compensación de 30 barras

Bus	Qc (MVar)	Pc(MW)
-----	-----------	--------

15	65.94535	0.00099
30	15.84083	0.00619

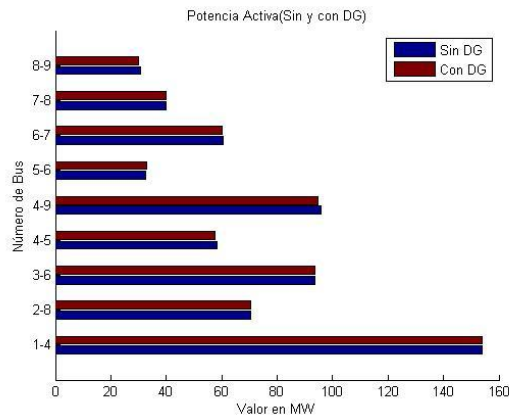


Figura 9. Potencia active de 9 barras

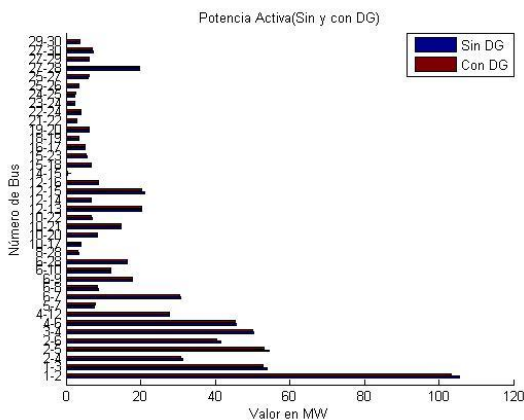


Figura 10. Potencia activa 30 barras

La figura 9 y 10, se puede ver la comparación de la potencia activa, antes de colocar DG y después de la ubicación DG, se puede notar como la potencia activa es compensada en el sistema de 9 y 30 barras, aludiendo el comportamiento de potencia, aunque para la potencia activa la compensación es mínima. Para la comparación de la compensación sin y con DG, para el caso potencia activa y reactiva se realiza en las líneas de tal manera que se pueda ver el comportamiento de las pérdidas en el sistema y su disminución con la DG indistintamente en cada línea.

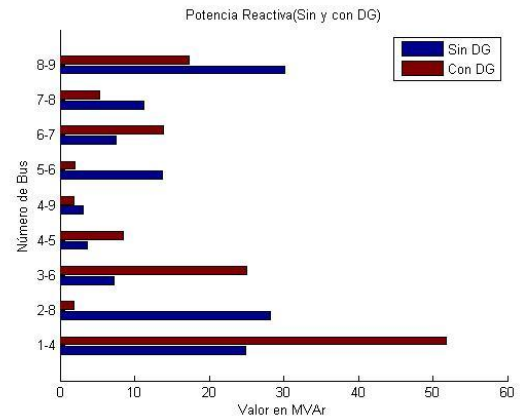


Figura 11. Potencia reactiva 9barras

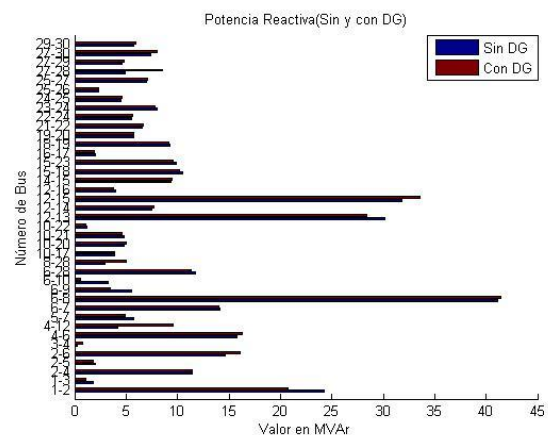


Figura 12. Potencia activa de 30 barras

La figura 13 muestra el comportamiento del voltaje en cada bus, sin implementar DG y con la colocación de la DG en los buses 6 y 8, se puede observar que el voltaje va mejorando en cada bus con la inyección de potencia reactiva, además el voltaje no supera los límites establecidos.

La figura 14 muestra el comportamiento del voltaje en cada bus, sin la DG y con la implementación de DG ubicado en el bus 15 y 30, se puede ver el comportamiento del voltaje y como este tiende a mejorar con la inyección de reactivos.

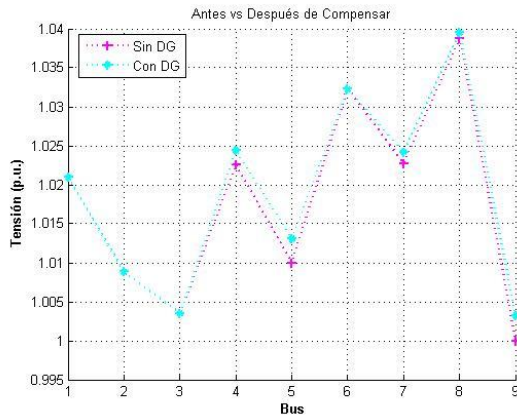


Figura 13. Sistema de 9 barras con DG y sin DG

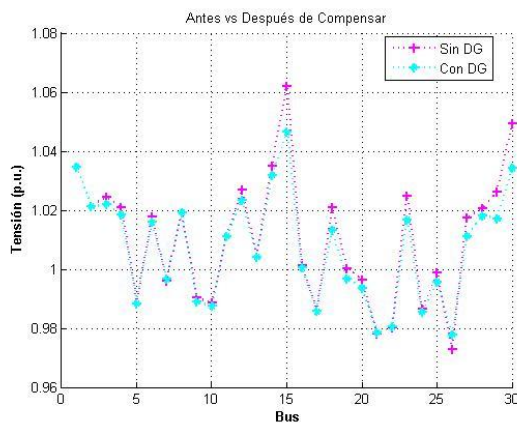


Figura 14. Sistema de 30 barras con DG y sin DG

Con la implementación de DG en las redes, su gestión ha sido el de controlar el factor de potencia (FP) manteniéndolo constante, si se mantiene constante FP, la relación entre la potencia activa y potencia reactiva tiende a mantenerse constante, de tal forma que el generador no pueda variar la potencia reactiva para compensar el aumento de voltaje. Al inyectar reactivos, la DG puede suministrar potencia activa, sin aumentar el nivel de voltaje, de tal manera que la DG pueda mantener y mejorar el perfil de voltaje.

Para el análisis del despacho económicos con las funciones de costo de tal manera que podemos mostrar el ahorro del sistema en (\$/h). El cual dentro de nuestro sistema una vez ubicado la generación distribuida tiene un ahorro de 5820.52234 dólares por cada hora que se efectuó el despacho con DG en el sistema del ahorro que tenemos dentro del

sistema de 30 barras es 876.26607 dólares.

6. Conclusiones

Al realizar el análisis en el sistema de distribución, se logró en primera instancia minimizar las pérdidas en el sistema de distribución, cumpliendo así el objetivo propuesto, además se mejoró los perfiles de voltaje, esto se pudo realizar a través de algoritmo de tabú search el cual nos permitió analizar el índice de estabilidad de cada barra, de tal manera que nos permita encontrar las barras adecuadas donde se colocara la DG dentro del sistema de distribución. Para el sistema de 9 barras la colocación de DG se realizó en las barras 6 y 8, mientras que para el caso de 30 barras la colocación se realizó en las barras 15 y 30. Con la implementación DG se mejora la estabilidad y confiabilidad del sistema de distribución, además se puede dar un mejor servicio y satisfacer la demanda en horas pico, dando un ahorro económico al sistema de energía.

7. Referencia

- [1] J. Vasco and A. Aguila, "Design of Automatic Reclosing scheme in distribution feeders," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 8, pp. 2587–2593, 2015.
- [2] D. P. Bernardon, A. P. C. Mello, L. L. Pfitscher, L. N. Canha, A. R. Abaide, and A. A. B. Ferreira, "Real-time reconfiguration of distribution network with distributed generation," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 107, pp. 59–67, 2014.
- [3] S. K. Injeti, V. K. Thunuguntla, and M. Shareef, "Optimal allocation of capacitor banks in radial distribution systems for minimization of real power loss and maximization of network savings using bio-inspired optimization algorithms," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 69, pp. 441–455, 2015.
- [4] A. Aguila, D. Carrión, and L. Ortiz, "Analysis of power losses in the asymmetrical," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015.
- [5] S. K. Injeti, V. K. Thunuguntla, and M. Shareef, "Optimal allocation of capacitor banks in radial distribution systems for minimization of real power loss and maximization of network savings using bio-inspired optimization algorithms," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 69, pp. 441–455, Jul. 2015.
- [6] B. Liu, F. Liu, S. Mei, and Y. Chen, "Optimal Reactive Power Flow with Exact Linearized Transformer Model in Distribution Power Networks," pp. 5562–5567, 2015.
- [7] S. X. Chen, Y. S. F. Eddy, H. B. Gooi, M. Q. Wang, and S. F. Lu, "A centralized reactive power compensation system for LV distribution networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 1, pp. 274–284, 2015.
- [8] N. Mohandas, R. Balamurugan, and L. Lakshminarasimman, "Optimal location and sizing of real power DG units to improve the voltage stability in the distribution system using ABC algorithm united with chaos," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 66, pp. 41–52, 2015.
- [9] A. Elmitwally, "A new algorithm for allocating multiple distributed generation units based on load centroid concept," *Alexandria Eng. J.*, vol. 52, no. 4, pp. 655–663, 2013.
- [10] F. S. Abu-Mouti and M. E. El-Hawary, "Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing in Distribution Systems via Artificial Bee Colony Algorithm," *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 26, no. 4, pp. 2090–2101, 2011.
- [11] M. Esmaili, E. C. Firozjaee, and H. A. Shayanfar, "Optimal placement of distributed generations considering voltage stability and power losses with observing voltage-related constraints," *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1252–1260, Jan. 2014.
- [12] D. Q. Hung, N. Mithulananthan, and R. C. Bansal, "Analytical expressions for DG allocation in primary distribution networks," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 3, pp. 814–820, 2010.
- [13] A. Mohamed Imran, M. Kowsalya, and D. P. Kothari, "A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution networks," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 461–472, 2014.
- [14] K. Muthukumar and S. Jayalalitha,

- “Optimal placement and sizing of distributed generators and shunt capacitors for power loss minimization in radial distribution networks using hybrid heuristic search optimization technique,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 78, pp. 299–319, Jun. 2016.
- [15] D. O. Ampofo, A. Ai-Hinai, and M. S. El Moursi, “Utilization of reactive power resources of distributed generation for voltage collapse prevention in optimal power flow,” *Proc. - Int. Conf. Sol. Energy Build. ICSOEB 2015*, pp. 1–5, 2015.
- [16] A. Gabash and P. Li, “Active-reactive optimal power flow in distribution networks with embedded generation and battery storage,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 4, pp. 2026–2035, 2012.
- [17] A. M. El-Zonkoly, “Optimal placement of multi-distributed generation units including different load models using particle swarm optimization,” *Swarm Evol. Comput.*, vol. 1, no. 1, pp. 50–59, 2011.
- [18] T. Gözel and M. H. Hocaoglu, “An analytical method for the sizing and siting of distributed generators in radial systems,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 6, pp. 912–918, Jun. 2009.
- [19] C. Kigen and N. A. Odero, “Optimising Voltage Profile of Distribution Networks with Distributed Generation,” *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 2, no. 12, pp. 89–95, 2012.
- [20] F. Castillo, A. Aguila, J. González, and S. Member, “Analysis of Stability of Tension and Losses of Electric Power in Distribution Networks with Distributed Generation,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 11, pp. 4491–4498, 2016.
- [21] R. Vafamehr, “Design of Electrical Power Supply System in an Oil and Gas refinery,” *CHALMERS Univ. Technol. , Master Sci. Thesis Electr. Power Eng. , Göteborg, Sweden, 2011*, no. 15–18, p. 70, 2011.
- [22] C. A. Patel, K. Mistry, and R. Roy, “Loss allocation in radial distribution system with multiple DG placement using TLBO,” in *2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, 2015, no. 1, pp. 1–5.
- [23] M. Sedghi, A. Ahmadian, and M. Aliakbar-golkar, “Optimal Storage Planning in Active Distribution Network Considering Uncertainty of Wind Power Distributed Generation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–13, 2015.
- [24] P. P. H. K. José-Antonio Domínguez, José-María Yusta, “Optimal power flow algorithm based in Tabu search for meshed distribution networks OPTIMAL POWER FLOW ALGORITHM BASED ON TABU SEARCH,” no. December, pp. 1–6, 2002.
- [25] N. Rugthaicharoencheep and A. Chalangsut, “Optimal Placement of Distributed Generation for Reliability Benefit in Distribution Systems,” vol. 2013, no. July, pp. 683–688, 2013.
- [26] Y. Nakachi, A. Kato, and H. Ukai, “Voltage / Reactive Power Control Optimization with Economy and Security using Tabu Search,” *2007 IEEE 22nd Int. Symp. Intell. Control*, no. October, pp. 634–639, 2007.
- [27] H. Khodr, “Optimal power flow algorithm based in Tabu search for meshed distribution networks OPTIMAL POWER FLOW ALGORITHM BASED ON TABU

- SEARCH,” vol. 0, no. December, pp. 24–28, 2016.
- [28] A. Aguila, “Medidas para minimizar las pérdidas de energía en circuitos de distribución,” Universidad de Ciego de Ávila, Cuba, 2010.
 - [29] B. Bakhshideh Zad, H. Hasanvand, J. Lobry, and F. Vallée, “Optimal reactive power control of DGs for voltage regulation of MV distribution systems using sensitivity analysis method and PSO algorithm,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 68, pp. 52–60, 2015.
 - [30] S. N. Gopiya Naik, D. K. Khatod, and M. P. Sharma, “Analytical approach for optimal siting and sizing of distributed generation in radial distribution networks,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 3, pp. 209–220, 2015.
 - [31] N. Acharya, P. Mahat, and N. Mithulananthan, “An analytical approach for DG allocation in primary distribution network,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 28, no. 10, pp. 669–678, 2006.
 - [32] S. G. Naik, D. K. Khatod, and M. P. Sharma, “Electrical Power and Energy Systems Optimal allocation of combined DG and capacitor for real power loss minimization in distribution networks,” *Int. J. Electr. POWER ENERGY Syst.*, vol. 53, pp. 967–973, 2013.